

ソフトウェア無線とは何か

――“柔らかいハードウェア”が携帯電話の世界を変える

第1章

原田博司

ここでは，ソフトウェア無線技術の概要と技術動向について解説する．ソフトウェア無線は，複数の通信方式に柔軟に対応できる無線通信装置を実現するための技術である．システムの中のアナログ/高周波部の割合を抑え，CPUのソフトウェア・プログラム，FPGAのコンフィグレーション・データを入れ替えることによって，対応する通信方式の変更を実現している．今後，ソフトウェア無線技術が普及すると，「ユーザの利便性が上がる」，「通信インフラの設備コストが下がる」などのメリットがある．（編集部）

近年，無線通信の世界では，ユーザのさまざまな要望に応じて，新しい通信システムが次々に導入されています．例えば，携帯電話やPHS（personal handyphone system）に代表されるセルラ移動通信の国内の利用者数の合計は，2004年2月末現在で8,500万人を超えています．また，無線通信を使って現状の有線通信に引けをとらない伝送速度を実現するマルチメディア移動無線アクセスもすでに利用されています．こうした無線アクセス・システムの例としては，安価でかつ数十Mbpsという高速通信を追求し，2.4GHz, 5GHz，および25GHz帯を用いる無線LAN（local area

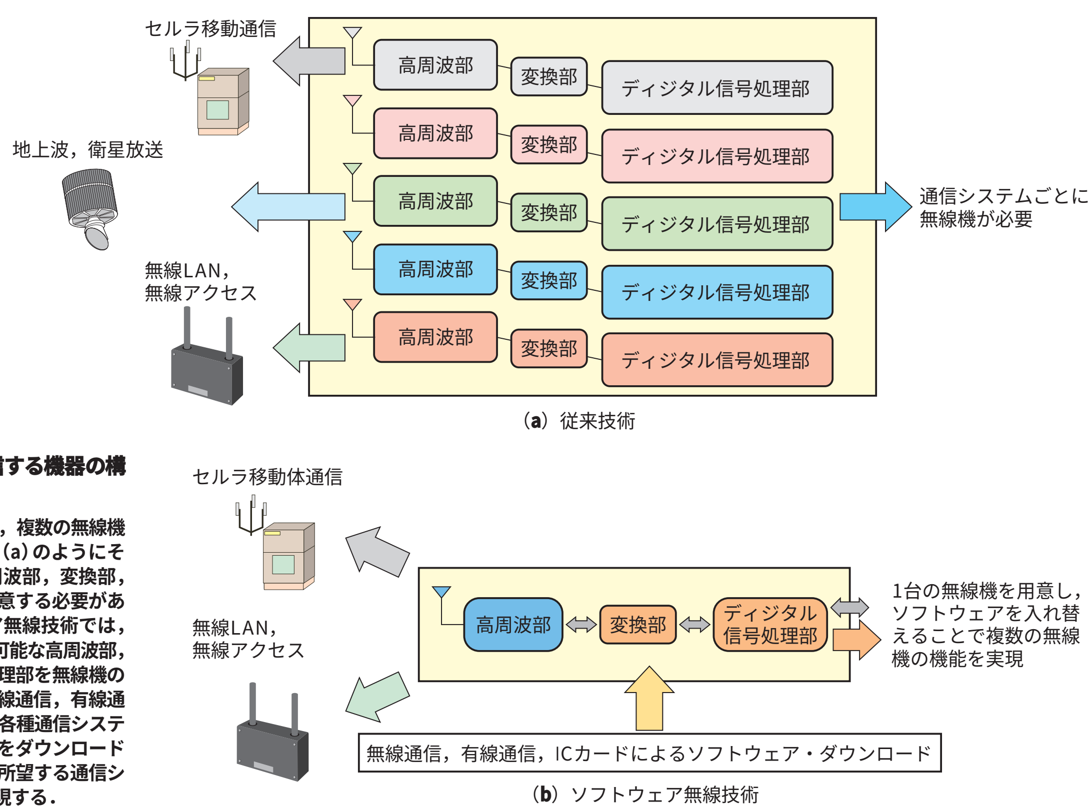


図1
複数の無線通信を送受信する機器の構成例
セルラ通信や無線LANなど，複数の無線機の機能を実現させる場合，（a）のようにその通信システムごとに高周波部，変換部，ディジタル信号処理部を用意する必要があった．一方，ソフトウェア無線技術では，ソフトウェアによって変更可能な高周波部，変換部，ディジタル信号処理部を無線機の中に組み込む．外部から無線通信，有線通信，ICカードなどによって各種通信システムを実現するソフトウェアをダウンロードすることにより，ユーザが所望する通信システムを1台の無線機で実現する．

network）系，無線LANと比較して機器コストが高いものの，通信速度が100Mbps以上と高速で，22GHz，26GHz，38GHz帯を用いるFWA（fixed wireless access）などの固定系があります．さらに，これらの無線通信システムに加えて，地上ディジタル放送に代表される放送システムについても，多種多様なサービスが検討されています．加えて，通信システムと放送システムを融合させたシステムやサービスなどの検討も進んでいます．

● 複数の方式に柔軟に対応できるソフトウェア無線

このように，今後，ユーザは多様なセルラ移動通信システム，無線アクセス・システム，放送システムを利用できるようになります．しかし，現状では，これらの無線アクセス・システムをすべて利用できる端末をユーザが持ち歩くことは困難です．新しい機能や使用可能な無線通信システムが増えるたびに，ユーザは無線機を交換または増設する必要があります（図1(a)）．そのため，一つの無線端末でさまざまな機能追加やシステム変更に対応できる無線機器の開発が求められています．

このような無線機器を実現する手段の一つが「ソフトウェア無線（software defined radio）」です．ソフトウェア無線技術を利用した無線機器（以下，ソフトウェア無線機と呼ぶ）は，以下の機能を備える高周波部，変換部，ディジタル信号処理部から構成されます．

- **高周波部**——各種無線機が無線信号を受信し，ディジタル信号処理を行いやすい周波数帯に変換する．作られた送信信号を実際に送信する周波数に変換し，アンテナを介して送信する．
- **変換部**——受信したアナログ信号をディジタル信号に変換する．送信するディジタル信号をアナログ信号に変換し，高周波部にその信号を渡す．
- **ディジタル信号処理部**——変復調および通信プロトコルの処理をつかさどる．FPGA（field programmable gate array），ディジタル信号処理プロセッサ（DSP：digital signal processor），汎用プロセッサ（CPU：central processing unit）などで構成される．

これらの機能は，各種無線通信システム，放送システムに対して汎用的に構成されており，かつ，無線通信や有線通信，ICカードなどを通じてソフトウェア（CPUのソフトウェア・プログラムやFPGAのコンフィグレーション・データ）を送り込むことによって，所望のシステムに合わせて内部の機能を改変できるようになっています（図1(b)）．

表1　FPGAのゲート規模の例（米国Xilinx社のVirtex-II）

	システム・ゲート数	スライス（Slice）数	コンフィグレーション・メモリ（ビット）
XC2V40	4万	256	400K
XC2V80	8万	512	600K
XC2V250	25万	1,536	1.7M
XC2V500	50万	3,072	2.8M
XC2V1000	100万	5,120	4.1M
XC2V1500	150万	7,680	5.7M
XC2V2000	200万	10,752	7.5M
XC2V3000	300万	14,336	10.5M
XC2V4000	400万	23,040	15.7M
XC2V6000	600万	33,792	21.9M
XC2V8000	800万	46,592	29.1M

● FPGAの大規模化により実現が可能に

ソフトウェア無線機の実現性の議論が盛んになってきた理由の一つとして，ディジタル信号処理用のFPGAに収容できる回路規模が増大したことが挙げられます．

簡単な変調器程度であれば数万〜数十万ゲート，もっとも高速な無線LAN用の変復調機能の場合は数百万ゲート・クラスのFPGAが必要になります[1]．10年前は数万ゲートのFPGAを手に入れるのがやっとでしたが，現在では800万ゲート・クラスのFPGA（表1）すら手に入れることが可能となってきました（けして値段は安くないが…）．

すなわち，ソフトウェア無線機のすべての変復調処理を，場合によってはたった一つのFPGAで実現することも可能となってきています．加えて，FPGAなどの開発ツールも安定，かつ高速に動作するようになってきており，さらに，数百万ゲート・クラスのFPGAに対して比較的高速に書き込み（コンフィグレーション）を行える環境が整いつつあります．

以上のような背景を受けて，本特集ではFPGAを利用したディジタル変復調回路やソフトウェア無線機の設計の実際を読者のみなさんに体感していただきたいと考えています．そして，本特集を通じてソフトウェア無線技術の有効性を理解していただければ幸いです．

● “携帯アプリ”のように通信機能をダウンロード

ソフトウェア無線技術は，現段階では図2のような形態で導入されていくものと考えられています．現状の端末では，ユーザはゲームや着メロといった各種アプリケーショ

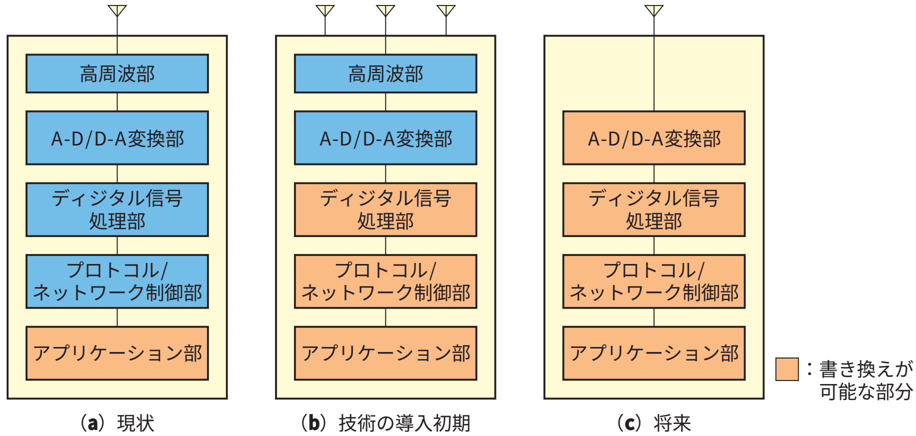


図2
ソフトウェア無線技術導入のシナリオ

現状，無線機においてユーザが変更できるのはゲーム，音楽などに代表されるアプリケーション部のみである．しかし，ソフトウェア無線を導入することにより，複数の無線通信システムを利用できるようになる．ただし，導入の初期段階においては，無線機のすべての部分を変更することはできない．理由は，A-D/D-A変換部がすべての無線周波数をディジタル信号に変換できないためである．したがって，変更できるのはディジタル信号処理部までになり，高周波部，A-D/D-A変換部は対応する無線通信システムの数だけ必要になる．将来のソフトウェア無線機は，無線機のすべての部分がソフトウェアによって変更可能になり，アンテナなども広帯域化されるだろう．

ンしか変更することができません．これに対して，ソフトウェア無線技術の導入初期は，ディジタル信号処理部などの機能の変更が可能となります．この場合，高周波部については複数のLSIで対応するか，もしくは広帯域な一つのLSIで対応します．そして，将来の究極の姿は，無線信号を受信した後，すぐにディジタル信号に変換し，すべての機能をディジタル信号処理で実現する方式です．

ソフトウェア無線機を導入するメリットは，いくつかあります．まず，新しい無線通信システムを利用したい場合や，既存の無線通信システムに新しい処理アルゴリズムを加えたい場合，複数の通信システムを併用したい場合，無線機を工場出荷時の状態に戻したい場合などに，システムの機能を容易に変更できます（図3）．ちょうど，現在のiアプリやEZアプリ（携帯電話におけるアプリケーション・ソフトウェアのダウンロード・サービス）のように，ユーザが希望する通信機能を実現するソフトウェアをダウンロードできるわけです．



図3　ソフトウェア無線技術を利用するメリット

ユーザが電話をかけるときに回線が混んでいても，回線のすいている通信システムを実現するソフトウェアを無線機にインストールすることにより，ユーザが希望する品質の通信を行うことができる通信システム用端末に変身させることができる．

また，ディジタル信号処理部は，現在のパソコン用メイン・ボードのように開発基盤が固定化されることになるため，開発した各種無線通信用ソフトウェアの使い回しが可能となります．開発期間が減少し，かつ産業廃棄物なども減ります．

● 米国ではFCCが新しいクラスとして認可

ソフトウェア無線技術については，1990年代初期よりさまざまな研究機関がディジタル信号処理プロセッサを使って，各種の通信用信号処理アルゴリズムを実行させていました．

プロジェクトとして検討されたものとしては，米国国防総省の研究開発部門であるDARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）などが行っていた「SPEAKeasyシステム」がまず挙げられます．これは，ソフトウェア無線技術を用いて，軍用の各種無線通信システムを一つの端末に集約することを目標としていました．Phase Ⅰが1992年～1995年に実施され，このフェーズではソフトウェア無線機を構築するうえで必要となる機能（高速A-D/D-Aコンバータなど）やLSIの検証と，各種軍事用通信システムのモデム機能だけを実現するソフトウェア無線機の試作などが行われました[(2)]．そして，1995年～1997年のPhase Ⅱでは，各種アーキテクチャの汎用化，モデムと高周波フロントエンド部，ネットワーク部のセキュリティの確保，高周波部の広帯域化などが検討され，機能検証や試作機の開発が行われました．そして，このプロジェクトに携わったメンバがソフトウェア無線技術の普及推進・啓蒙を目指して，1996年に「MMITS（Modular Multifunction Information

Transfer System)フォーラム」を設立しました．MMITSは，普及推進・啓蒙活動だけでなく，各種標準化組織への支援，および連携なども行っています[注]．

米国におけるソフトウェア無線機の認可については，FCC(Federal Communications Commission；米国連邦通信委員会)が検討を進めています．FCCでは，ソフトウェア無線機における周波数，送信出力，および変調方式の変更を新しいクラス(Class III)として扱っています．そして，申請者は，その機器がソフトウェア無線機であることを申告するとともに，ソフトウェアで動作する部分が適用基準や無線信号発射基準に適合していることを証明する試験成績書を提出します．無線機に対する試験は，ソフトウェア無線機を構成するハードウェアとソフトウェアの組み合わせに対して行います．そして，システムの変更は許可取得者のみが行うこととし，ハードウェアが変わらないことを条件に使用を許可しています．

また，FCCから承認を受けた後であれば，ソフトウェアは屋外などでもダウンロードすることが認められています．加えて，ソフトウェア無線機はソフトウェアがFCCで認可されたものかどうかを示すため，LED表示などの「電子ラベル」によるFCC判定番号の表示を求めています．

一方，欧州では，1997年に第1回目のソフトウェア無線技術に関するワークショップが開かれています(4)．そして，EC(European Commission；欧州委員会)の通信関係プロジェクトであるACTS(Advanced Communications Technologies)プログラム，ESPRIT(European Strategic Program for Research and Development in Information Technology)プログラムなどにおいて，2003年3月まで複数のプロジェクトを立ち上げていました(5)．2000年からはIST(Information Society Technologies)というプログラム名で，10以上のソフトウェア無線関連のプロジェクトが進行しています．

● 90年代後半に日本も業界団体や学会などが検討開始

日本では1996年度～1998年度に，電波産業会(ARIB)において，「ソフトウェアで受信機能を実現する受信技術の調査検討会」が開かれ，ソフトウェア無線技術の現状把握，技術課題の抽出，求められる性能，試作機によるソフトウェア受信機の実現可能性の評価が行われました．また，電子情報通信学会においてもソフトウェア無線研究会(6)が1998年12月に発足し，ソフトウェア無線技術の理論やハードウェア技術，ソフトウェア技術の検討などが行われています．そして，いくつかの試作機も開発されました(表2)．

ソフトウェア無線機が世の中に出てきたとき，ハードウェアの開発元(ハードウェア・メーカ)とソフトウェアの開発元(ソフトウェア・ベンダ)が異なる可能性があります．そして，場合によっては，ソフトウェア無線機が技術基準に適合しているかどうかを検査する認定機関において，ハードウェアとソフトウェアが別々に持ち込まれ，別々に審査される可能性があります．このような状況に対応するため，テレコムエンジニアリングセンター(TELEC)(8)は，2000年度(平成12年度)より3年間，「セキュリティを考慮した技術基準適合評価システムはどうあるべきか」，「将来の技術基準適合評価システムはどうあるべきか」などについて，「無線設備のソフトウェア技術に関する調査検討会」を開催し，試作機を通して検討を行ってきました．

● 道路交通情報システムから携帯電話まで実現

筆者らが所属する情報通信研究機構(NICT，旧 郵政省通信総合研究所)においても，1997年よりソフトウェア無線機の研究開発を行っています．そして1999年には，PHS，ETC(electronic toll collection；有料道路などの自動料金収受)システム，GPS (Global Positioning System；全地球測位システム)に対応した高度道路交通システム用ソフトウェア無線機を開発しました(写真1)(9)．

また，2001年には，幅17.5cm，奥行き19.0cm，高さ5cm

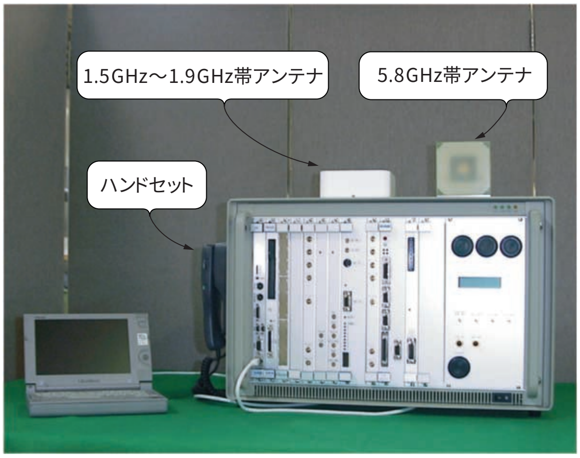


写真1　1999年に筆者らが開発したソフトウェア無線機(1号機)

注：MMITSフォーラムは，後にSDR(Software Defined Radio)フォーラム(3)と改名した．

のETC，FM/AMラジオ，VICS（Vehicle Information and Communication System；道路交通情報システム），GPS，FM文字多重放送を受信できるソフトウェア無線機を開発しました（**写真2**）．このソフトウェア無線機はマルチタスク処理の機構を備えており，複数の通信システムの同時処理が可能です．CPUのソフトウェア・プログラムやFPGAのコンフィグレーション・データのダウンロードは，Ethernetを通じた有線のみならず無線を介して行うことができます．

さらに，2004年には，第3世代携帯電話（W-CDMA）シ

表2　国内で試作されたソフトウェア無線機の例

文献（7）を参考として，それに独自の調査結果を入れて作成した．

試作機関	電波産業会（1998年度）	通信総合研究所（1999年度）	NTT（1999年度）	東芝（1999年度）	東北電力，東洋通信機（1999年発表）	日立国際電気（1999年度）	NEC（1997年度）
試作対象	電波監視応用を目指したソフトウェア受信機	高度道路交通システム用ソフトウェア無線機	ソフトウェア無線基地局/端末	ダイレクト・コンバージョン方式によるソフトウェア無線機	インテリジェント基地局	ソフトウェア無線機	ソフトウェア受信機
構　成	アンテナ部，サンプリング部（RF，IF，ADC），信号処理部（DSP），CPU部，モニタ	RF部（PHS，GPS，ETC用），IF+ADC+DAC部，FPGA+DSP部，制御部	RF+IF部，ADC+DAC部，プリ/ポストプロセッサ部，DSP部，インターフェース部，CPU部	アンテナ部，ダイレクト・コンバージョン受信部，送信部，ADC+DAC部，ディジタル・ダウン・コンバータ部，DSP部	RF部，ADC+DAC部，DSP部，インターフェース部，CPU部，モニタ	ADC+DAC+FPGA部，DSP部，インターフェース部，制御部	RF部，信号処理部（ADC+DSP+CPU），制御部
サンプリング方式	BBオーバサンプリング	IFアンダサンプリング	IFアンダサンプリング	BBオーバサンプリング	—	IFアンダサンプリング	IFアンダサンプリング
対応システム	特定せず	PHS，GPS，ETC（システムとして組み込み），GSM（変復調のみ），ユーザ・モード	PHS（システムとして組み込み），疑似セルラ通信	PHS，GSM，PDC（変復調のみ）	—	—	PHS（変復調のみ）
対応RF周波数	27MHz，900MHz，500MHz，2GHz	1.9GHz，1.5GHz，5.2GHz	2.45GHz	1.5GHz～2GHz	370MHz～380MHz	—	25MHz～3GHz
一括処理帯域	32kHz	2.048MHz	13MHz	送信45MHz，受信10MHz	—	—	10MHz
IF周波数	—	10MHz（PHS，ユーザ・モード），40MHz（ETC）	25MHz，39MHz	なし	送信10MHz～20MHz，受信65MHz～75MHz	455kHz～100MHz	21.4MHz
チャネル帯域	32kHz	2.048MHz（最大）	300kHz（PHS），75kHz	25kHz～192kHz	送信1.25MHz，受信650kHz	—	—
対応伝送速度	8kbps，6kbps，32kbps	384kbps（PHS），1.023Gサイクル/s（GPS），1.024Mbps（ETC），384kbps，270.833kbps（ユーザ・モード）	384kbps（PHS），96kbps（疑似セルラ通信）	384kbps（PHS），270.833kbps（GSM），42kbps（PDC）	—	50bps～64kbps	384kbps（PHS）
対応変調方式	BPSK，QPSK，π/4シフトQPSK，GMSK，FM，AM	π/4シフトQPSK（PHS），BPSK+SS（GPS），ASK（ETC），QPSK，GMSK，π/4シフトQPSK	π/4シフトQPSK（PHS），BPSK，QPSK，π/4シフトQPSK，16QAM（適応変調）	送信π/nシフトPSK，n-FSK（n=2～8），受信n-PSK，π/4シフトQPSK，GMSK，MSK	π/4シフトQPSK，FM	FSK，BPSK，QPSK，6QAM，AM，FM，SSB	BPSK，QPSK，π/4シフトQPSK，8PSK，6QAM，FSK，MSK，GMSK，AM，FM
DACの性能	なし	50Mサンプル/s（14ビット）	104Mサンプル/s（10ビット）	40Mサンプル/s（10ビット）	40Mサンプル/s（12ビット）	最大125Mサンプル/s（14ビット）	なし
ADCの性能	5Mサンプル/s（12ビット）	60Mサンプル/s（10ビット）	52Mサンプル/s（12ビット）	64Mサンプル/s（12ビット）	40Mサンプル/s（12ビット）	最大65Mサンプル/s（12ビット）	40Mサンプル/s（12ビット）
ディジタル信号処理の能力	1,600×4MIPS	1,600×4MIPS	1,600×4MIPS	1,600MIPS	1ボード当たり320MFLOPS	1モジュール当たり3,200MIPS	1,200MFLOPS
その他の特徴	MUSIC，DCMPアルゴリズム搭載	GPS+ETC，PHS+ETCの同時運用可能，差分情報駆動変復調回路	無線ダウンロード機能，適応変調	差動符号化，畳み込み符号化，フィルタ係数可変	—	—	電波分析アルゴリズム搭載

ADC：analog-digital converter　AM：amplitude modulation　ASK：amplitude shift keying　BB：base-band　BPSK：binary phase shift keying　CCK-SS：complementary code keying-spread spectrum　CPU：central processing unit　DAC：digital-analog converter　DCMP：direction constrained Minimization of Power　DSP：digital signal processor　ETC：electronic toll collection　FLOPS：floating-point operations per second　FM：frequency modulation　FPGA：field programmable gate array　FSK：frequency shift keying　GMSK：Gaussian filtered minimum shift keying　GPS：Global Positioning System　GSM：global system for mobile communication　IF：intermediate frequency　MIPS：million instructions per ↗

ステムと無線LAN（IEEE 802.11a）システムの切り替えが可能なソフトウェア無線機を開発しました（写真3）[1]．このソフトウェア無線機は，無線の信号処理を行う無線信号処理部と，カメラによって撮影したり，自分や通話相手の顔などを見ながら通話できる表示部からなります．無線信号処理部の内部はFPGA信号処理部とCPU信号処理部，高周波信号処理部からなり（写真4），それらが図4の構成で接続されています．各ボードの概要を表3に示します．

この試作機の特徴は，FPGA信号処理部とCPU信号処理部に汎用性の高い（つまり，調達しやすい）デバイスを使用していることです．したがって，ソフトウェア無線機の開

通信総合研究所（2001年発表）	NTT（2001年発表）	ソニーコンピュータサイエンス研究所（2000年度）
高度道路交通システム用ソフトウェア無線機	ソフトウェア無線基地局/端末	広帯域ダイレクト・コンバージョンを利用したソフトウェア受信機
RF部（PHS，GPS，ETC用），IF+ADC+DAC部，FPGA部，制御部	RF+IF部，ADC+DAC部，プリ/ポストプロセッサ部，DSP部，インターフェース部，CPU部	RF部，信号処理部，制御部
IFアンダサンプリング	IFアンダサンプリング	BBオーバサンプリング
ETC，VICS，AM/FMラジオ，FMマルチサービスGPS（システムとして組み込み），PHS，GSM（変復調のみ），ユーザ・モード	PHS，IEEE 802.11b（システムとして組み込み）	—
500kHz～600kHz，76MHz～100MHz，1.5GHz，5.8GHz	1.519GHz，2.45GHz	2.45GHz，5.25GHz
—	—	—
70kHz～5MHz	66MHz	なし
—	—	—
1.023Gサイクル/s(GPS)，1.024Mbps（ETC），384kbps（PHS），270.833kbps（GSM）	384kbps（PHS），96kbps（IEEE 802.11b）	帯域幅15Mbpsで処理できる信号
ASK（ETC），BPSK+SS（GPS），QPSK，GMSK，π/4シフトQPSK，BPSK	π/4シフトQPSK（PHS），CCK-SS（IEEE 802.11b）BPSK，QPSK，8PSK	16QAM，64QAM
20Mサンプル/s（14ビット）	88Mサンプル/s（14ビット）	—
20Mサンプル/s（10ビット）	88Mサンプル/s（12ビット）	—
FPGAのみ使用	1,600×4MIPS	—
最大5種類の同時運用可能，差分情報駆動変復調回路，小型，12V-2A動作	フレキシブル・レート・プレ/ポスト・プロセッサを使用	ダイレクト・コンバージョンの帯域は500MHz～9GHz

↘ second　MSK：minimum shift keying　MUSIC：multiple signal classification　PDC：personal digital cellular　PHS：personal handyphone system　PSK：phase shift keying　QAM：quadrature amplitude modulation　QPSK：quadrature phase shift keying　RF：radio frequency　SS：spread spectrum　SSB：single sideband



（a）ソフトウェア無線機本体

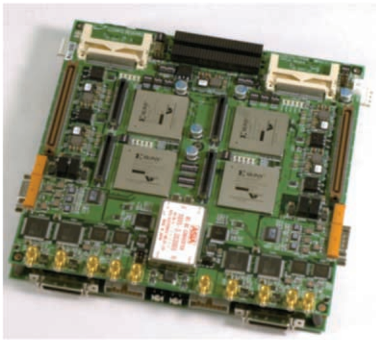


（b）車に設置したところ

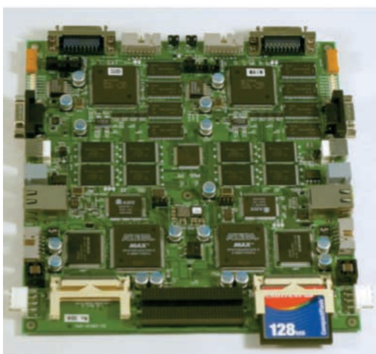
写真2　2001年に筆者らが開発したソフトウェア無線機（2号機）



写真3　2004年に筆者らが開発したソフトウェア無線機（3号機）



(a) FPGA信号処理部



(b) CPU信号処理部



(c) 高周波信号処理部



(d) すべてを組み合わせたもの

写真4　ソフトウェア無線機(3号機)の無線信号処理部

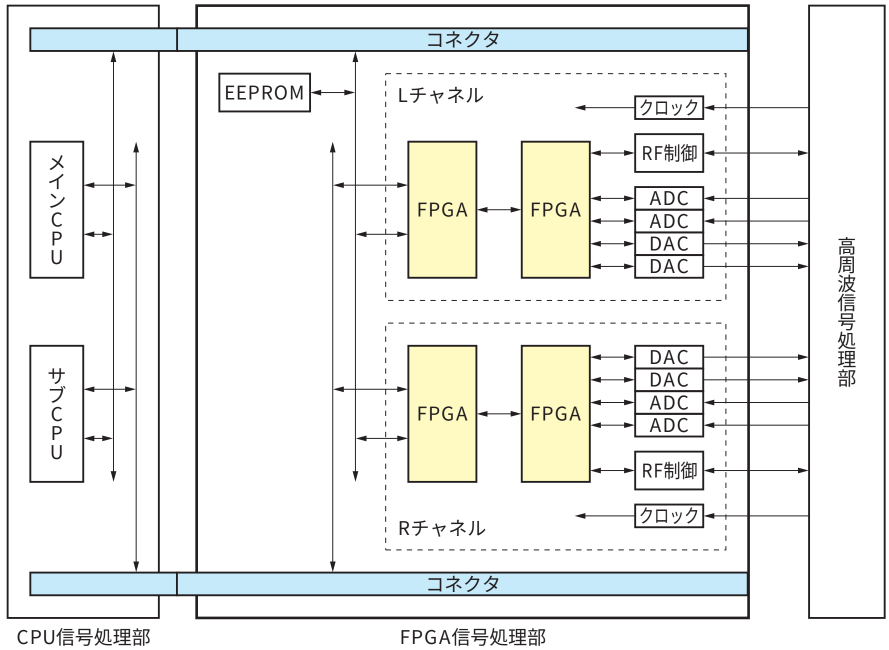


図4　ソフトウェア無線機(3号機)の各信号処理部間の接続

無線機は，二つのCPUを搭載するCPU信号処理部，四つのFPGAを搭載するFPGA信号処理部，高周波信号処理部からなる．FPGA信号処理部は二つのチャネルに分かれており，それぞれFPGAを二つずつ備えている．一つのチャネルがおもに一つの無線通信システムの処理を担当する．また，高周波信号処理部は複数の無線通信方式の処理に対応している．それぞれの信号処理部にソフトウェア・プログラムやコンフィグレーション・データをインストールすることにより，所望の無線通信システムを実現する．

表3　ソフトウェア無線機(3号機)の各信号処理部の概要

項　目	仕　様
FPGA信号処理部	
A-Dコンバータ	2チャネル，170Mサンプル/s，12ビット，0dBm入力
D-Aコンバータ	2チャネル，500Mサンプル/s，12ビット，0dBm出力
FPGA	Xilinx社のXC2V4000，XC2V6000，XC2V8000から選択可能
IF/RFボード・インターフェース	アナログ入力(2チャネル)，アナログ出力(3チャネル)，Cont(5ビット)
外部クロック・インターフェース	入力5MHz～66MHz，0dBm，2/4/8/16倍クロックを自動生成
外部出力	最大80Mバイト/sのCPUインターフェース，最大600Mバイト/sの外部出力
CPU信号処理部	
CPU	430MIPS(240MHz動作)×2個
OS	μITRON(PrKERNEL v4)
I/O	CompactFlash，RS-232-C，USB，Ethernet，JTAG
高周波信号処理部	
対応周波数	5GHz帯用ボード，2GHz帯用ボード

Cont：conversion transmitter

発者が共通に使用するプラットホームとして適しており，さまざまな市販の開発ツールと組み合わせて利用することができます．また，複数のFPGAを搭載しているので，複数の通信システムを並列に動作させることも可能です．高周波信号処理部については，ユーザがFPGA信号処理部(FPGAボード)との接続条件を合わせ，必要なものを用意

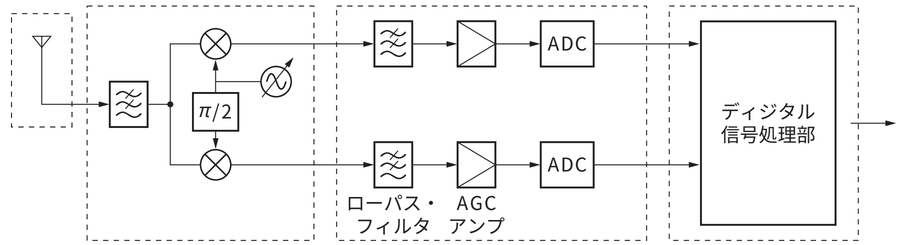


図5
ダイレクト・コンバージョン受信機
無線信号の周波数と同じ周波数帯の信号を用いて，変換部が直接ディジタル信号処理を行いやすい周波数帯に変換する．部品点数が少なく，無線機を小型化するためには必須の技術の一つである．

して接続する必要があります．

ソフトウェア無線機全体の管理（ソフトウェア・インストール，ソフトウェア・ダウンロード，通信システムの選択など）には，今後の携帯電話への組み込みを勘案してリアルタイムOS（今回はμITRON）を利用しています．

この試作機では，セルラ系無線通信システムとしてW-CDMAシステムの，無線LAN系としてIEEE 802.11aシステムのソフトウェアを準備しました．W-CDMAについては，市販のW-CDMA基地局シミュレータと接続可能です．また，TCP/IP（transmission control protocol/internet protocol）より下の物理層，MAC（media access control）層のプロトコル処理は，CPUのソフトウェア・プログラムやFPGAのコンフィグレーション・データとして実現しています．TCP/IPおよびVoIP（voice over IP）のプロトコルの一つであるSIP（session initiation protocol）も準備したので，TCP/IPを用いた動画像転送やVoIPによる音声通信も可能です(1)．

● 高周波部の課題：特性の良い小型広帯域ミキサが必要

図2（c）に示した最終形態のソフトウェア無線機を構築するためには，現状，以下のような五つの検討課題があります．

- **高周波部に関する課題**
- **変換部に関する課題**
- **ディジタル信号処理部に関する課題**
- **組み込みに伴うセキュリティ上の課題**
- **開発環境に関する課題**

それぞれの課題について，順番に説明していきます．

高周波部については，ディジタル信号処理部で作られ，変換部でディジタル信号からアナログ信号に変換された送信信号を，広帯域に渡って所望の無線周波数帯へアップ・コンバートする機能が必要です．また，アンテナで受信した広帯域の信号を，ディジタル信号処理部で処理しやすい

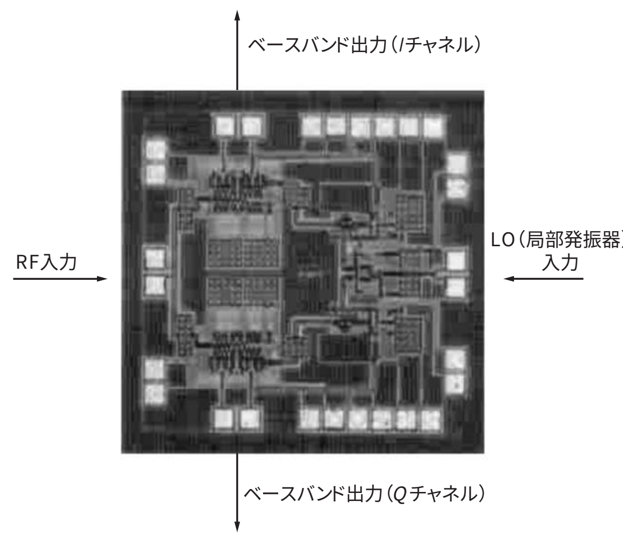


写真5 小型広帯域ミキサの例

周波数帯に変換する機能も必要です．とくに受信側については，高周波数帯から低周波数帯に直接変換するダイレクト・コンバージョン受信デバイス（**図5**）を開発する必要があります．高いレベルの信号が所望の帯域内に複数入った場合，ダイナミック・レンジが低下する問題や，ミキサの非線形性ひずみによって2次ひずみが生じる問題などがまだ残っています．

現状，各研究機関が特性の良い小型広帯域ミキサについて研究しており，**写真5**はその成果の例です．NICTが委託し，三菱電機が開発しました(10)．このミキサは，チップ・サイズが1mm×1mmと小さいものの，800MHz～5.2GHz帯の入力信号を，ディジタル信号処理が可能な0～100MHz程度のベースバンド帯の信号に直接変換します．

● 変換部の課題：高速，低消費電力のADCが必要

変換部では，できるだけ高速，高分解能，低消費電力でアナログ信号とディジタル信号を相互に変換する機能が必要になります．一般にD-Aコンバータのサンプリング・レ

ートや分解能よりも，A-Dコンバータのそれのほうが特性が良くありません．そこで，ここではA-Dコンバータの課題について説明します．

表4に市販のA-Dコンバータの特性例を挙げています．この表より，例えば12ビット分解能で100MHz程度のサンプリング・レートであれば，問題なく実現できそうです．現在の無線LAN（例えばIEEE 802.11a）の所要帯域が18MHz分程度であることを考えると，周波数チャネルごとの信号のサンプリングを行うことは十分に可能です．しかし，今後，割り当てられている通信帯域をすべてサンプリングしたいという要望が出てくるかもしれません．そのため，さらなるサンプリング・レートの向上が期待されることになります．また，端末化を行う場合，かなりの低消費電力も求められます．

表4　市販A-Dコンバータの特性例

型　名	メーカ名	分解能（ビット）	サンプリング周波数（MHz）
AD9433	Analog Devices社	12	105
AD9214		10	208
AD9410		10	105
AD9432		12	200
AD9054A		8	100
AD9288		8	100
AD9071		10	100
TDC1029	TRW社	6	100
SPT7760A	Signal Processing Technologies社	8	1,000
HADC77100		8	150
CXA1176K	ソニー	8	250
CXA1276K		8	400

● DSP部の課題：複数方式に対してどこを共通化するか

ディジタル信号処理部の検討課題としては，各通信システムを実現するソフトウェアの容量やダウンロード時間を削減する通信用ディジタル信号処理のハードウェア・アーキテクチャ，およびソフトウェア・アーキテクチャの問題があります．この課題を解決する一例として，差分情報駆動型プロセッサの研究が行われています[11]．

現在，移動体通信システムには複数の種類がありますが，送受信機の構成は基本的に**図6**のようになっています．そして，各種変復調方式によって異なるのは，送信信号のマッピングの位置やフィルタ係数，使用する符号の種類などです．つまり，基本的な回路をあらかじめ組み込んでおけば，あとはパラメータの変更のみで各種通信システムの切り替えを実現できます．このように，各通信システムにおいてパラメータのみの変更で対応できる共通部分と，各通信システム間で完全に異なる部分をまず分離します．そして，共通部分はあらかじめ組み込んでおき，その部分はパラメータだけを変え，システムの切り替えにかかる時間を極力減らすようなハードウェア構成にします．

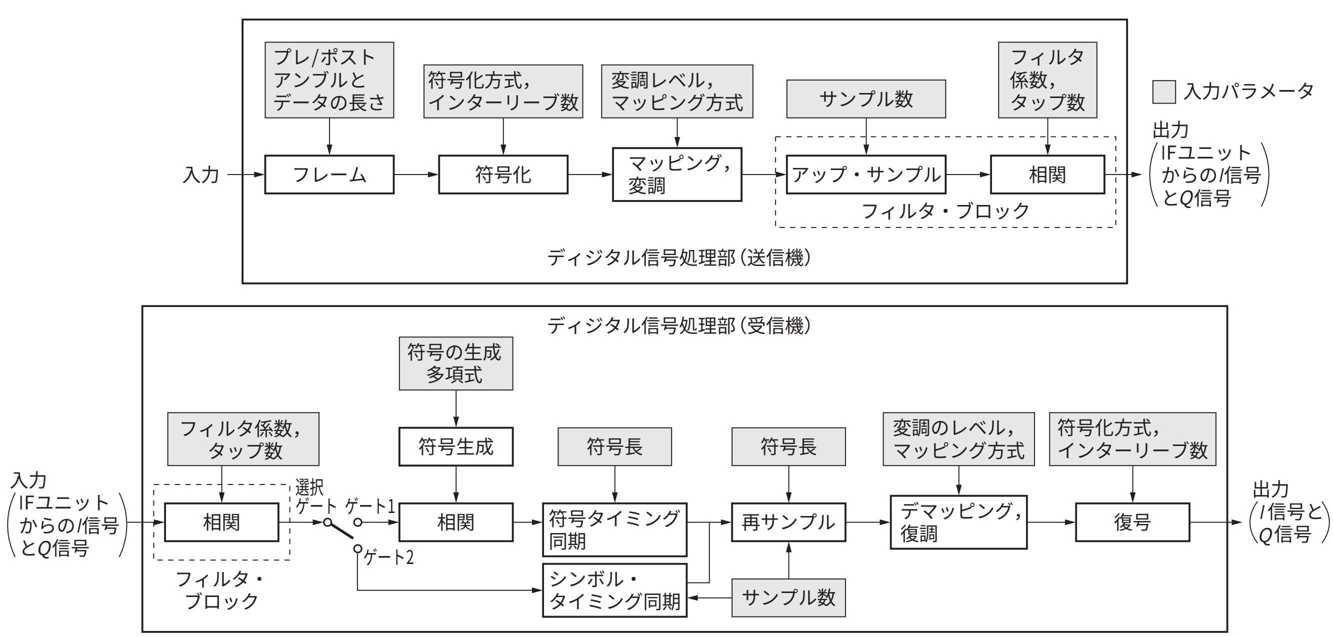


図6　差分情報駆動型プロセッサの構成

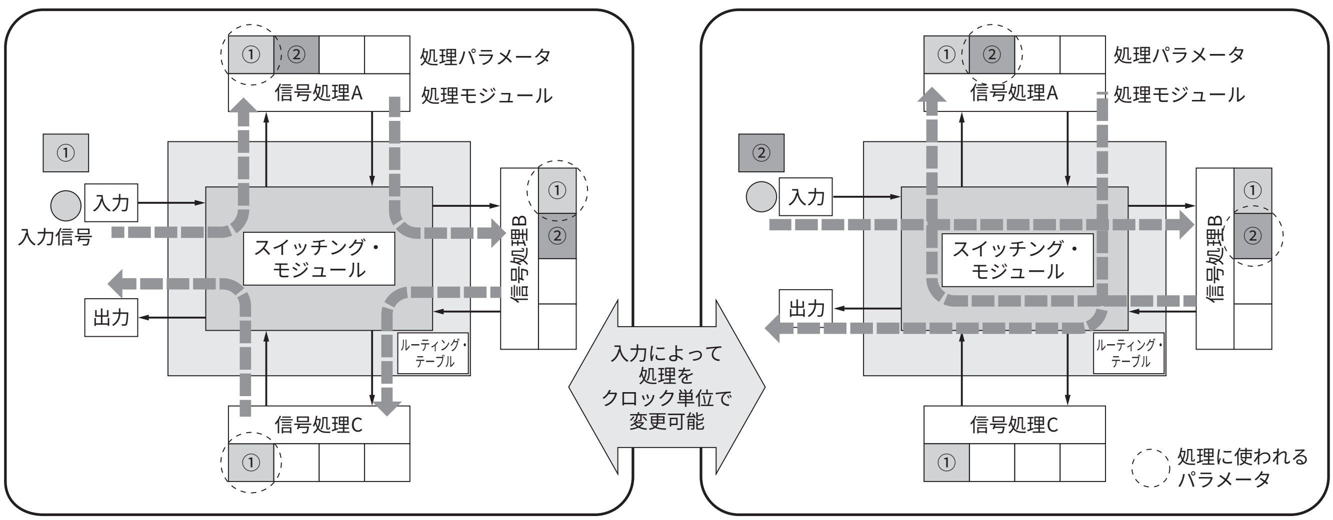
各通信システムにおいて，パラメータのみの変更で対応できる部分をあらかじめディジタル信号処理部の中に組み込んでおく．これにより，外部からパラメータを各ブロックに入力する際のダウンロード時間が短くなる．

これをさらに発展させたのが，図7に示すパラメータ変更可能な動的信号処理技術です[12]．これは，各種通信システムでパラメータのみで変更できる部分を共通化し，複数の信号処理モジュール群に分けます．そして，そのモジュール群の間に，モジュール間へのデータ渡しを行うためのスイッチング・モジュールを置きます．ディジタル化された信号は，このスイッチング・モジュールによって転送先を振り分けられるようにパケット化を行い，パケットの先頭のデータを見れば，次にどのモジュールに渡せばよいかがわかるようにします．こうすることにより，複数の通信システムの信号を受信した場合でも，処理を1クロック単位に変更できます．

このほか，無線，有線にかかわらず，CPUのソフトウェア・プログラムやFPGAのコンフィグレーション・データを有効にダウンロードするプロトコルなどの検討も行う必要があります．また，複数のシステムに対して同時に信号処理を行うと，それぞれのシステムのクロック・レートや要求される通信品質が異なるケースが多くなります．このような状況下でもきちんとディジタル信号処理を行えるマルチタスク信号処理手法についての検討が必要になります．

● セキュリティの課題：ハードとソフトの開発元が別々

先に述べたように，今後，ソフトウェア無線機が世の中に出てきたときに，ハードウェア・メーカとソフトウェ



(a) データ①が入力された場合　(b) データ②が入力された場合

図7　差分情報駆動型モジュールとスイッチング・モジュール

各種通信システムに対して，パラメータだけで変更できる部分を共通化し，複数の信号処理モジュール群に分ける．そして，モジュール群間でデータを渡すためのスイッチング・モジュールを置く．ディジタル化された信号は，このスイッチング・モジュールによって各モジュールへ振り分けられるようにパケット化を行う．このパケット化されたデータをあらかじめ決められた順にモジュール間で受け渡し，所望の処理を実現する．

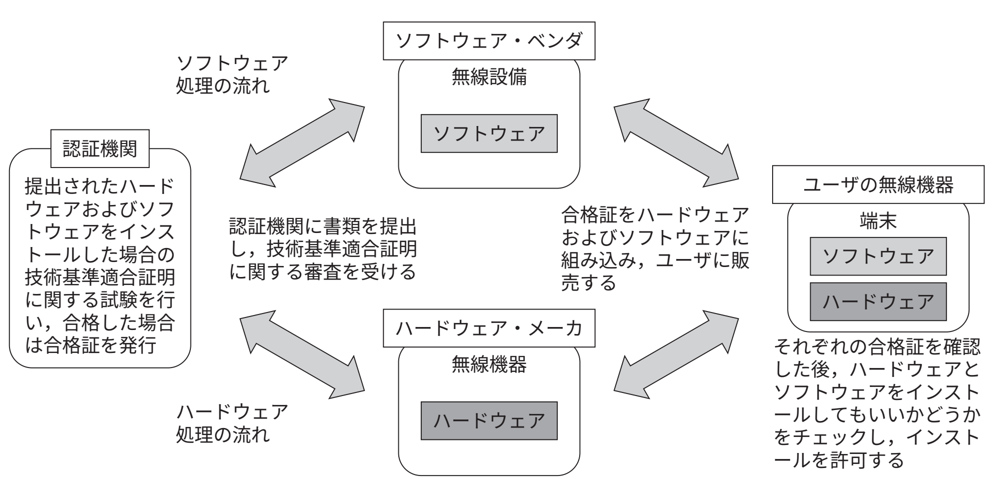


図8
ソフトウェア無線機におけるハードウェアとソフトウェアの流通
ソフトウェア無線技術が普及すると，ユーザはハードウェア・メーカからハードウェアを，ソフトウェア・ベンダからソフトウェアを買うことになるかもしれない．そしてメーカやベンダの製品は，それぞれ認証機関において電波法が定める技術基準を満たしていることが証明される必要がある．

ア・ベンダが異なる会社である可能性があります(**図8**). そして,無線機が技術基準適合証明にのっとっているかどうかを検査する認証機関では,場合によっては,ハードウェアとソフトウェアが別々に持ち込まれ,別々に審査しなければならない可能性もあります.

認証機関では,持ち込まれたハードウェアにソフトウェアを組み込み,各種無線通信システムに対して定められた技術基準に適合するかどうかを審査します.合格の場合は,ハードウェア・メーカおよびソフトウェア・ベンダに合格証を発行します.そして,それぞれのメーカ,ベンダはその合格証を何らかの形で組み込んだハードウェア,およびソフトウェアをユーザに販売します.このとき,ハードウェア・メーカとソフトウェア・ベンダは,まず,その供給物が認証機関の合格証を備えているかどうかを確認し,その後,それぞれ供給するハードウェアとソフトウェアの組み合わせが基準に適合していることを確認してから,ハードウェアに対してソフトウェアをインストールすることを許可することになります.このとき,とくに重要となるのは,供給したハードウェアとソフトウェアの組み合わせがきちんと適合していることをどのような機構によって確認するかということです.

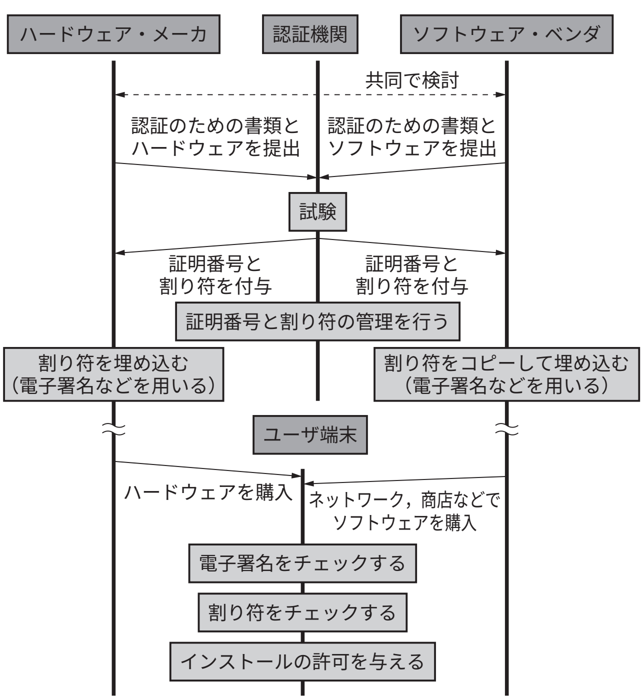


図9 割り符を用いた認証のフロー
ハードウェア・メーカとソフトウェア・ベンダはそれぞれ,製品を認証機関に持ち込み,検査を受け,合格証と,ハードウェアとソフトウェアの関連性を示した割り符をもらう.

もし,技術基準適合証明をとったハードウェアとソフトウェアであっても,それぞれの組み合わせが適合していないと,不必要に広い帯域で信号を出す無線機になったり,大電力を送信する無線機になり,ほかの通信システムに悪影響を与える可能性があります.すなわち,ソフトウェアをハードウェアにインストールするときのセキュリティを検討する必要があります.

ここで問題となるのが,古いハードウェアに新しいソフトウェアの存在を知らせる方法です.古いハードウェアは,古いソフトウェアの存在は知っていますが,新しいソフトウェアの存在を知りません.先に示したテレコムエンジニアリングセンター(TELEC)(8)の調査検討会では,この機構について一つの提案を行っています.それは「割り符」という符号を用いて,ソフトウェアとハードウェアの対応関係を記述し,対応ソフトウェアと対応ハードウェアを互いに知らせようというものです(13).

図9に割り符を用いた認証のフローを示します.まず,ハードウェア・メーカおよびソフトウェア・ベンダは共同でそれぞれのハードウェアおよびソフトウェアを開発します.そして,認証のための書類を用意し,それぞれ開発したものとともに認証機関に持ち込みます.このとき,ハードウェア・メーカとソフトウェア・ベンダは**図10**に示す表を提出します.**図10**の例では,ハードウェア・メーカが製造した型番"A"のハードウェアに,ソフトウェア"い","う","お"が対応していると申請していることになります.

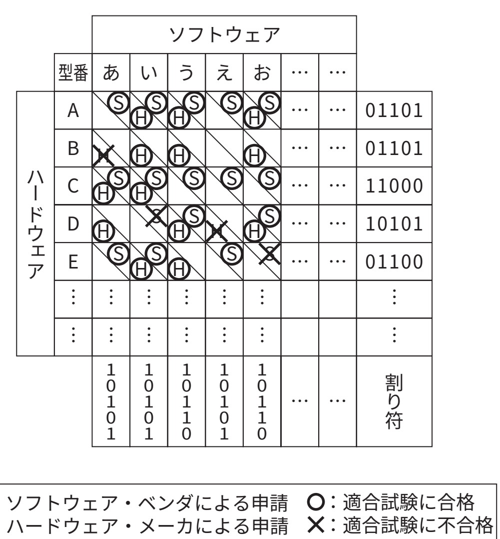
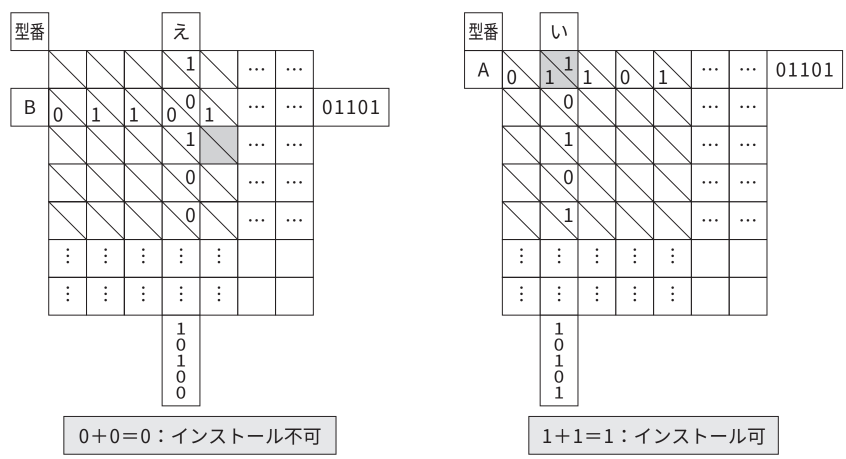


図10 割り符の作りかた
ハードウェア・メーカおよびソフトウェア・ベンダは,それぞれ検査に合格した組み合わせについて符号を付ける.

一方，ソフトウェア・ベンダが開発した“ あ ”のソフトウェアには，“ A ”，“ C ”，“ E ”のハードウェアが対応していることがわかります．このような表をもとに，認証機関が実際に技術基準に適合しているかどうかを試験します．この試験に合格すると表に○が，合格しないと×が付きます．

図10では，“ A ”のハードウェアについて，申請したソフトウェア“ い ”，“ う ”，“ お ”のすべてが試験に合格したようです．一方，ソフトウェア“ あ ”については，ハードウェア“ A ”，“ C ”，“ E ”ともに対応可能であるということがわかりました．そこで，それぞれのハードウェア，ソフトウェアの型番ごとに合格の場合は符号の‘ 1 ’を，不合格の場合は符号の‘ 0 ’を割り当てます．**図10**の例では，ハードウェアAについては申請したソフトウェア“ い ”，“ う ”，“ お ”のみが合格なので，“ 01101… ”が割り振られます．ソフトウェア“ あ ”についてはハードウェア“ A ”，“ C ”，“ E ”が対応可能なので，“ 10101… ”が割り振られます．これを割り符と呼びます．試験の結果，認証機関は証明番号と割り符をハードウェア・メーカおよびソフトウェア・ベンダに付与します．そして，それぞれの会社はその割り符をハードウェア，ソフトウェアに埋め込みます．この埋め込みかたとしては，電子署名などの方法が考えられます．

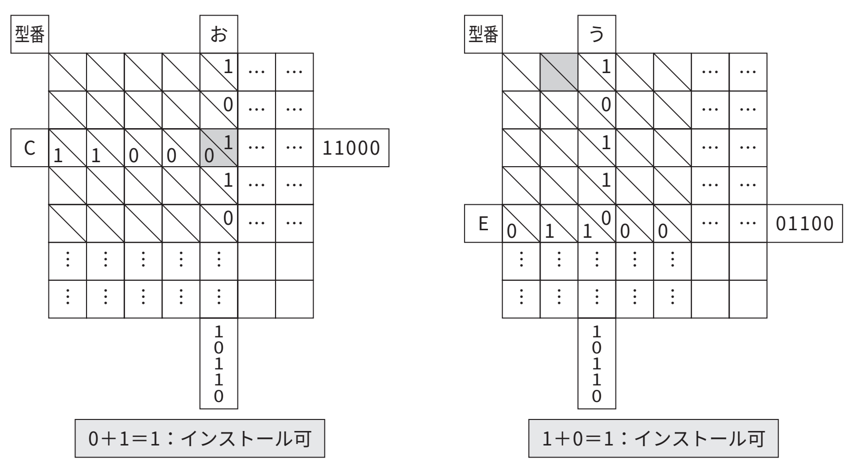
ユーザ端末においては，ユーザがそれぞれハードウェアとソフトウェアを購入します．そして電子証明をチェックし，問題がなければ，次に割り符のチェックを行います．その例を**図11**に示します．**図11(a)**ではハードウェア“ B ”とソフトウェア“ え ”の割り符の照合が行われています．どちらも割り符は‘ 0 ’なので，インストールは不可となります．一方，**図11(b)**はハードウェア“ A ”とソフトウェア



（a）ソフトウェア無線装置（B）にソフトウェア（え）をインストールした場合

（b）ソフトウェア無線装置（A）にソフトウェア（い）をインストールした場合

図11
割り符の照合（基本形）
割り符がそれぞれハードウェア側で‘ 1 ’，ソフトウェア側で‘ 1 ’であれば，インストール可とする．また，逆の場合はインストール不可とする．



（a）ソフトウェア無線装置（C）にソフトウェア（お）をインストールした場合

（b）ソフトウェア無線装置（E）にソフトウェア（う）をインストールした場合

図12
割り符の照合（新旧のソフトウェアとハードウェアの組み合わせ）
割り符がそれぞれハードウェア側かソフトウェア側のいずれかで‘ 1 ’である場合，インストール可とする．

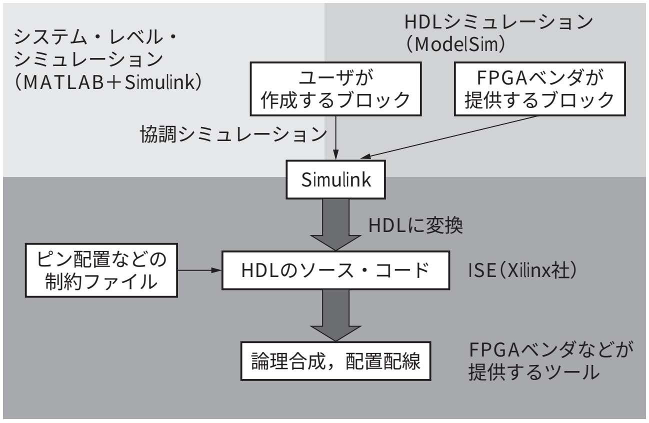


図13　ソフトウェア無線機の今後の開発環境
今後はシステム・シミュレーションとHDLシミュレーションを共存させた協調シミュレーションが必要になる．

“い”を照合しています．これは，どちらも‘1’なので，インストールは可になります．

一方，**図12**のように片方が‘1’で片方が‘0’の場合はどうなるのでしょう．片方が‘1’ということは，試験した結果，動作するということなので，これもインストールは可としています．このようなケースとしては，古いハードウェアに新しいソフトウェアを入れる場合が考えられます．なぜなら，新しいソフトウェアは古いハードウェアの存在を知っており，古いハードウェアは新しいソフトウェアの存在を知らないからです．

また，新しいハードウェアに古いソフトウェアを入れる場合も同様です．古いソフトウェアは新しいハードウェアの存在を知りません．このような場合もハードウェアに対するソフトウェアのインストールを認めます．このようにすることで，ソフトウェア，ハードウェアの新旧にかかわらず，ソフトウェアをハードウェアにきちんとインストールできます．

この割り符方式はあくまでも一例にすぎません．今後は，このような考えかたをベースにして，ソフトウェア無線技術特有のインストール時のセキュリティの問題を検討していくことになります．

● 開発環境の課題：協調シミュレーションの環境が必要

最後の課題は開発環境についてです．現状，FPGAに対する書き込み(コンフィグレーション)データの作成過程では，まず，Verilog HDLやVHDLといったハードウェア記述言語(HDL：hardware description language)で各種ディジタル信号処理アルゴリズムに対応した回路をコーディングします．そして，HDLシミュレータでシミュレーションを行い，評価します．これはつねにディジタルの世界のシミュレーションになります．すなわち，結果は2進数で示されることが基本です．

一方，実際の設計者には，できるだけ10進数やアナログ波形の形で動作を確認したいという要求があります．米国The MathWorks社の「MATLAB/Simulink」に代表される信号処理のシステム・レベル・シミュレーションを行うツールでは，基本的に信号をアナログ的に確認しながら検証作業を進めることになり，視覚に訴えることができます．ただし，FPGAなどに実装することを想定してリアルタイム処理の実現可能性を検討する場合(細かいタイミングをチェックする場合)などは，十分に検証が行えません．

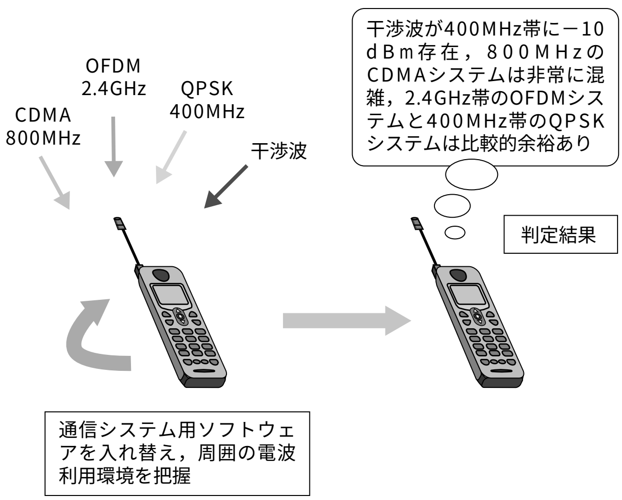
いちばん良いのは，システム・レベル・シミュレーションとHDLレベルのシミュレーションを共存させることです(**図13**)．例えば，HDLで記述したコードがMATLAB/Simulinkに読み込まれ，MATLAB上で記述されたシステム・レベルの関数と協調してシミュレーションできれば，視覚的に動作を理解しやすくなり，バグも見つけやすくなると思います．

● ユーザの利便性を向上，通信インフラのコストも削減

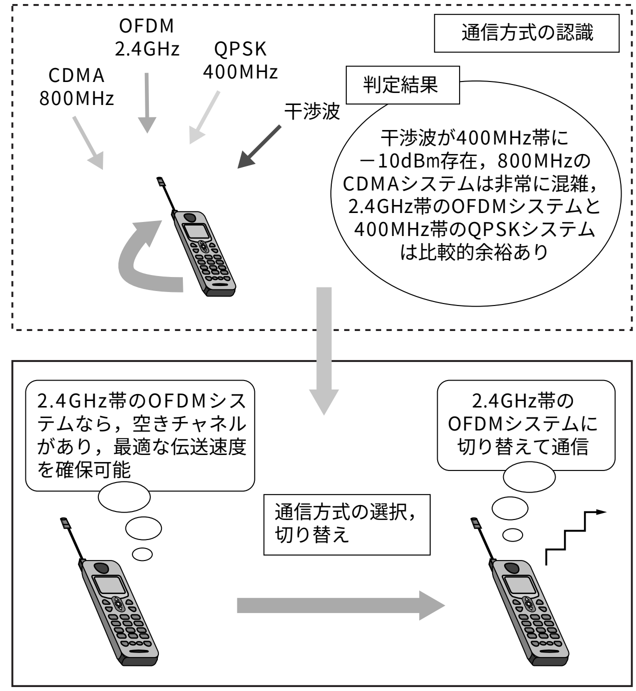
最後に，今後，ソフトウェア無線技術がどのような方向へ発展していくのかについて，まとめます．まず，端末にソフトウェア無線技術を導入した場合の将来像について述べます．

ソフトウェア無線技術を利用すると，一つの端末(通信装置)に対して，各種通信方式を切り替えて使用できます．この切り替えの速度を高速化していくと，ユーザが立っている位置に応じて，「どの通信システムが使用可能か」，「混雑ぐあいがどうなっているか」を調べられることになります(**図14(a)**)．すなわち，「通信方式の認識」を実現できます．次に，前述のようにして認識した通信システムから，ユーザが支払う料金や緊急度などに応じて最適な通信システムを選択し，それを運用することができます(**図14(b)**)．すなわち，「通信方式の選択」を実現できるわけです．さらに，空いている通信システムが多い場合は，複数の通信システムを同時に使って伝送する方法も実現できます(**図14(c)**)．すなわち，「通信方式の合成」を実現できます．

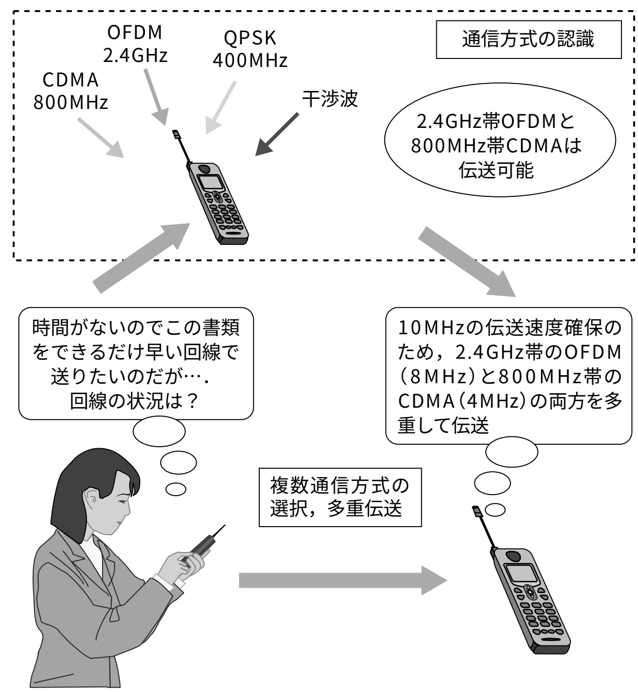
次に，基地局側にソフトウェア無線技術を導入した場合



(a) 通信方式の認識



(b) 通信方式の選択



(c) 通信方式の合成

図14　ソフトウェア無線技術を端末に応用した場合の利点

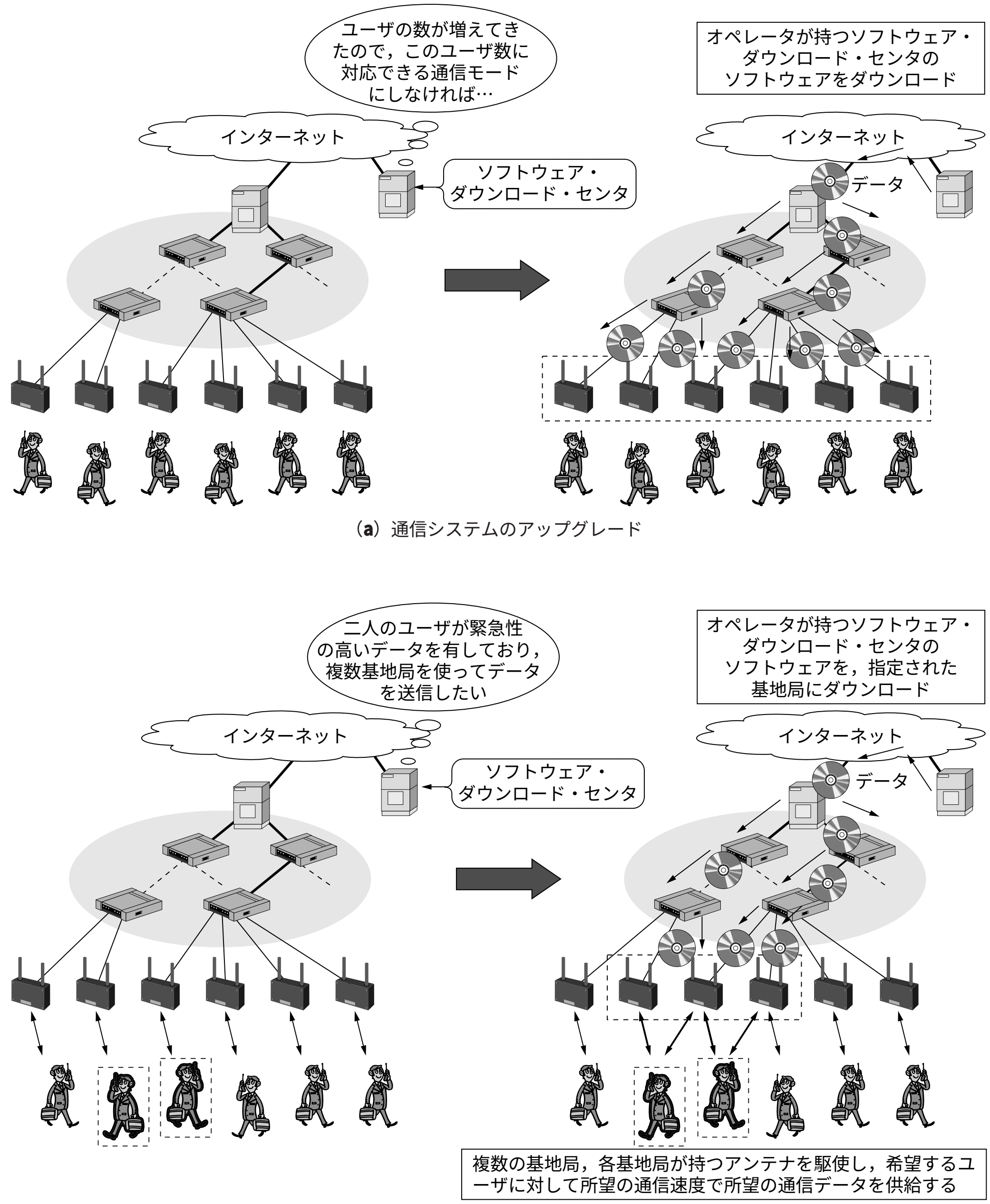
ソフトウェア無線技術を用いることにより，通信方式の認識が可能になる．また，認識結果によって，システムの選択を行えるようになる．さらに，場合によっては二つの通信方式を合成し，通信容量の引き上げを図ることもできる．

の利点について述べます．

例えば，ある地域のユーザ数が急激に増加し，通信システムや方式そのものを見直すことを余儀なくされているとします．このとき，もし基地局がすべてソフトウェア無線技術で構築されていれば，ソフトウェアをダウンロードすることによって通信システムをアップグレードできます．基地局を設置し直す必要はありません(**図15(a)**)．また，基地局を遠隔制御できるので，ユーザの要求に合わせて複数の通信システムの同時運用なども実現可能となります(**図15(b)**)．

さらに，ソフトウェア無線技術は周波数の有効利用の観点からも有用な技術です．現状，無線周波数は地域性に関係なく通信システムごとに固定的に割り当てられています．そのため，「特定のシステムが特定の地域で多く使われている」といった地域格差が生じているものと思われます．一方，ソフトウェア無線が使われるようになると，周波数が割り当てられていてもその使用頻度が低い地域では，その周波数を使用頻度の高い通信システムに切り替えてしまうことができます(**図16**)．これを実現するには，別の通信システムからの干渉の推定技術などを確立し，前述の通信方式の認識，選択，合成の各技術を駆使する必要があります．

また，現在，放送のディジタル化などに伴って，周波数帯に空きが出ています．そして，この空いた帯域を有効に使用する方法として，使用する周波数を再編(デフラグメンテーション)することが考えられます(**図17**)．ただし，これには既存の通信システムの周波数変換などが必要となり，莫大な費用がかかります．一方，通信方式の認識，選択，合成の各技術を用いれば，空いた周波数を選択して通信のために使用することが可能となります．このように通信方



(**a**) 通信システムのアップグレード

(**b**) 複数の通信システムの同時運用

図15
ソフトウェア無線技術を基地局に応用した場合の利点
基地局に応用することにより，基地局に属しているユーザの要求に合わせて，基地局の仕様を変更することができる．

式の認識，選択，合成の各技術を駆使して周波数を有効利用する技術を「コグニティブ無線(cognitive radio)」と呼び，現在，その実現可能性について議論が始まっています．

＊　　＊　　＊

さて，本特集では，ソフトウェア無線技術の開発の過程を体験していただこうと考えています．また，システム・レベル・シミュレーションとHDLシミュレーションを共存させ，視覚的にわかりやすく無線機が設計できることを示したいと考えています．第2章では，ディジタル変復調の基礎とシステム・レベル・シミュレーションの手法について述べます．第3章では，システム・レベル・シミュレーションとHDLシミュレーションを共存させる方法を，QPSK変調方式を用いた送信機の作成を通じて示します．また，第4章では，実際にソフトウェアを切り替えるところを体感できるように，π/4シフトQPSKとASKの切り替えが可能な送信機を作成します．そして最後の第5章では，第3章および第4章で作成した無線機を，本誌2005年1月号付属のFPGAボードに実装する方法を解説します．

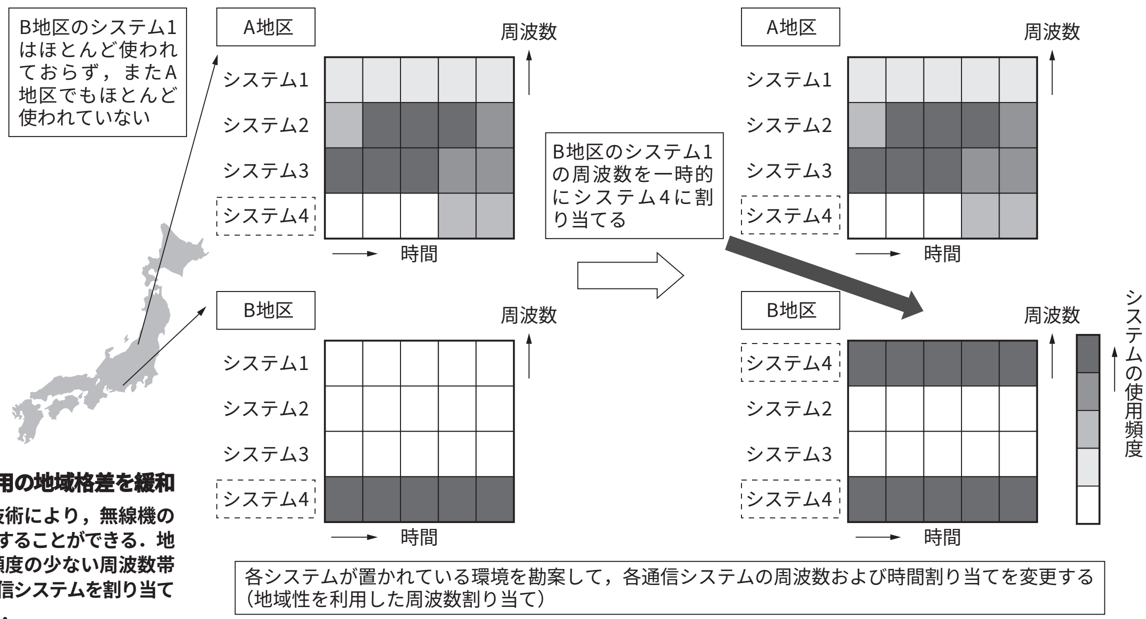


図16
通信システムの利用の地域格差を緩和
ソフトウェア無線技術により，無線機の周波数を自由に変更することができる．地域において，使用頻度の少ない周波数帯に使用頻度の高い通信システムを割り当てることも可能となる．

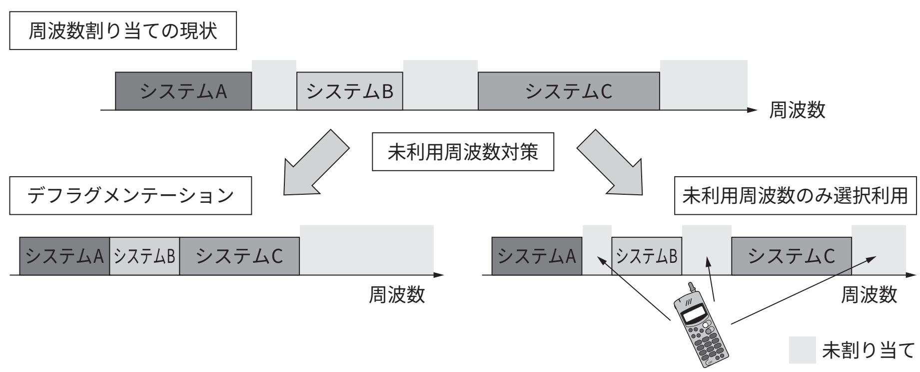


図17
利用されていない周波数への対策
現在は，技術の向上によって周波数の有効利用が図られており，その結果，未利用周波数が点在している．周波数の再編（デフラグメンテーション）も一つの方法だが，ソフトウェア無線を使えば，空いている周波数を一つの端末で利用できる．

参考・引用*文献

(1) 原田博司；新世代モバイル通信システムに対応したソフトウェア無線端末の開発―概要とシステム構成―，無線通信システム研究会，2004年6月．
(2) R. J. Lackey，D. W. Vpmal，Speakeasy；“ The Military Software Radio ”，IEEE Communication Magazine，pp.56-61，May 1995.
(3) SDRフォーラムのホームページ，http://www.sdrforum.org/.
(4) European Commission DG XIII-B；Proceeding of “ Software Radio Workshop ”，May 1997.
(5) H. Harada and R. Prasad；“ Simulation and Software Radio for Mobile Communications ”，Artech House Publishers，May 2003.
(6) 電子情報通信学会 ソフトウェア無線研究会のホームページ，http://www.ieice.or.jp/cs/sr/jpn
(7) 鈴木康夫，荒木純道；ソフトウェア無線機とその国内における開発の状況，電子情報通信学会 論文誌B，vol.J84-B，no.7，pp.1120-1131，2001年7月．
(8) 財団法人テレコムエンジニアリングセンターのホームページ，http://www.telec.or.jp.
(9) H. Harada，Y. Kamio，M. Fujise；“ Multimode Software Radio System by Parameter Controlled and Telecommunication Component Block Embedded Digital Signal Processing Hardware ”，IEICE Transaction on Communications，Vol.E83-B，No.6，pp.1217-1228，June 2000.
(10) 蔭山千恵美，中島健介，堤恒次，谷口英司，下沢充弘，末松憲治；“ 0.8-5.2GHz帯マルチバンド/マルチモード，ダイレクトコンバージョン受信機用SiGe MMIC Q-MIX ”，電子情報通信学会 マイクロ波研究会，2004年4月．
(11) 原田博司，神尾享秀，藤瀬雅行；“ 高度道路交通システムにおけるマルチモード・マルチサービスソフトウエア無線通信システム―概要と試作検討結果― ”，電子情報通信学会 ソフトウエア無線研究会，1999年11月．
(12) 横山昭久，井上仁志，原田博司；“ パケットルーティング型 パラメータ動的変更信号処理プラットフォームの提案 ”，電子情報通信学会 無線通信システム研究会，2004年11月．
(13) Y. Suzuki, H. Harada, K. Uehara, T. Fujii, Y. Yokoyama；“ Adaptibility Check during Software Installation in Software Defined Radio ”，*IEICE Transaction on Communications*，vol. E86-B，no.12，pp.3401-3407，Dec. 2003.

はらだ・ひろし
独立行政法人 情報通信研究機構